

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Návrh vyhodnocovacího obvodu pro indukční snímače

Design evaluation-circuit for induction-sensing unit

2009

Jan Lanča

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 4. května 2009

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňkovi Tesařovi za věcné rady a připomínky, které mi pomohly při řešení zadaného tématu.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem vyhodnocovacího obvodu pro indukční snímač posunutí.

První kapitola se zabývá vysvětlením pojmu senzor a základním rozdělením senzorů polohy.

Druhá kapitola seznamuje se základními typy indukčnostních senzorů polohy. Popisuje jejich principy a modifikace konstrukčního uspořádání. U senzorů bývají možné řešení vyhodnocovacích obvodů. Pro názornost je tato kapitola doplněna řadou obrázků a schémat.

V třetí kapitole je popsán samotný návrh vyhodnocovacího obvodu pro diferenciální indukčnostní senzor polohy. Výstup vyhodnocovacího obvodu tvoří proudová smyčka 0 až 20mA s uzemněnou zátěží. Pro přehlednost je zde uvedeno blokové schéma s popisem funkce. Dále následuje návrh s výpočty jednotlivých částí vyhodnocovacího obvodu.

Klíčová slova:

Senzor, indukčnostní senzor, vyhodnocovací obvod

Abstract

This bachelor thesis is engaged in design evaluation-circuit for induction transducer displacement.

The first part explains concept of sensor and basic position sensor division.

In the second part basic types of position induction-sensors are introduced. Their principles and structural configuration modifications are described here, too. Chosen sensor types include samples of solutions their evaluation-circuits. The pictures and drawings are enclosed for clearness.

The third chapter describes the own drawing evaluation-circuit for differential position induction-sensor. The evaluation-circuit output creates 0 – 20 mA current loop with grounded load. The block diagram and function description clarify the design. The calculation of evaluation-circuit parts tails after.

Keywords:

Sensor, induction-sensor, evaluation-circuit

Seznam použitých symbolů a zkratek

a, b	rozměr a, b
Al	hliník
$C [F]$	kapacita
cca	přibližně
$d [m]$	vzdálenost (průměr, mezera)
D/A	převodník digitálního signálu na analogový
DPS	deska plošných spojů
$f [Hz]$	kmitočet (frekvence)
$H [A/m]$	intenzita magnetického pole
$I [A]$	elektrický proud
$i [A]$	okamžitá hodnota proudu
IO	integrovaný obvod
$L [H]$	indukčnost
$l_{Fe} [m]$	délka feromagnetika
$l_i [m]$	délka střední siločáry
$M [H]$	vzájemná indukčnost
$N [-]$	počet závitů
OZ	operační zesilovač
p	velikost kroku
$R [\Omega]$	elektrický odpor
$R_m [H^{-1}]$	činná složka magnetického odporu
$S [m^2]$	plocha
$S_d [m^2]$	plocha mezery
$S_{Fe} [m^2]$	plocha feromagnetika
$SR [V/\mu s]$	rychlost přeběhu
$t [s]$	čas
$U [V]$	elektrické napětí
$u [V]$	okamžitá hodnota napětí
U/I	převodník napětí na proud
$UG [V]$	napětí generátoru
$U_{ref} [V]$	referenční napětí
$U_v [V]$	napětí nerovnováhy můstku

$U_z [V]$	<i>zdrojové napětí</i>
x	<i>posuv</i>
$XC [\Omega]$	<i>kapacitní reaktance (kapacitance)</i>
$XL [\Omega]$	<i>indukční reaktance (induktance)</i>
$X_m [H^{-1}]$	<i>jalová složka magnetického odporu</i>
$Z [\Omega]$	<i>impedance</i>
$Z_m [H^{-1}]$	<i>magnetická impedance (reluktance)</i>
$\alpha [^\circ]$	<i>úhel natočení</i>
$\delta [m]$	<i>hloubka vniku</i>
$\Delta d [m]$	<i>změna vzdálenosti</i>
$\Delta L [H]$	<i>změna indukčnosti</i>
$\mu_0 [H.m^{-1}]$	<i>permeabilita vakua</i>
$\mu_{Fe} [H.m^{-1}]$	<i>permeabilita feromagnetika</i>
$\mu_r [H.m^{-1}]$	<i>poměrná permeabilita</i>
$\rho [\Omega.m]$	<i>rezistivita (měrný elektrický odpor)</i>
τ	<i>časová konstanta</i>
$\varphi [rad]$	<i>fázový úhel</i>
$\omega [rad/s]$	<i>úhlová rychlost</i>
$\Phi [Wb]$	<i>magnetický tok</i>

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Senzor.....	10
2.1	Senzory polohy	10
3	Indukčnostní senzory polohy	12
3.1	Rozbor a náhradní schéma	12
3.2	Impedance senzoru.....	13
3.3	Rozdělení senzorů	14
3.4	Indukčnostní senzory s proměnnou vzduchovou mezerou.....	15
3.4.1	Indukčnostní senzor mezerový	15
3.4.2	Diferenční indukčnostní senzor.....	16
3.4.3	Diferenciální tlumivkový senzor s posuvným magnetickým zkratem	17
3.4.4	Senzor s proměnnou plochou vzduchové mezery	18
3.4.5	Indukčnostní senzor s pohyblivou cívkou.....	18
3.5	Indukčnostní senzory s otevřeným magnetickým obvodem	20
3.5.1	Diferenční indukčnostní senzor s posuvným jádrem	20
3.5.2	Lineární diferenční transformátorový senzor polohy LVDT	20
3.6	Induktosyn.....	23
3.7	Selsyny a resolvery	25
3.8	Indukčnostní senzory na principu vířivých proudů	26
3.9	Magnetostrikční senzory polohy	30

4	Návrh vyhodnocovacího obvodu pro indukčnostní senzor	31
4.1	Indukčnostní senzor MS/1275.....	31
4.2	Blokové schéma	31
4.3	Blok A	33
4.4	Blok B	34
4.5	Blok C	38
4.6	Blok D	39
4.7	Blok E	41
5	Závěr	44
	Seznam příloh	47
	Příloha I.....	48
	Příloha II	49

1 Úvod

Dnešní svět si bez vlivu automatizační techniky nedovedeme ani představit. Lidé si od pradávna snažili ulehčit práci pomocí jednoduchých nástrojů. S postupem času a rozvojem techniky se nástroje zdokonalovaly a začaly vznikat složitější celky. To byl jeden z podnětů ke vzniku samostatného oboru automatizace. Zvláště vývoj vědy a techniky od minulého století do současnosti prošel četnými změnami, které si dávají za úkol neustále zkvalitňovat život společnosti.

S rozvojem automatizace vznikla nutnost získávání dostatečného množství informací o jednotlivých procesech. Jednotlivé informace se soustřeďují, aby bylo možné část nebo celý výrobní proces řídit z jediného místa. Ke sběru informací slouží snímače. Práce se věnuje jen indukčním snímačům, což je jen část z velkého množství snímačů, které se běžně používají. Bakalářská práce se skládá z několika částí, které jsou uspořádané do jednotlivých kapitol. V první části jsou popsány jednotlivé typy indukčních snímačů a jejich vlastnosti. Dále se přechází k části, která je věnována výstupním vyhodnocovacím obvodům.

V druhé části je vlastní návrh vyhodnocovacího obvodu pro indukční snímač posunutí, zakončený proudovou smyčkou, což je úkol této bakalářské práce.

2 Senzor

Senzor je jednou z nejdůležitějších částí měřicího obvodu. Je prvním členem v měřicím řetězci, který má přímý styk s měřeným předmětem. Na jeho kvalitě jsou závislé následující připojené části obvodu.

Hned v úvodu práce jsem zjistil, že v různých publikacích [1], [3], [4], které se zabývají problematikou senzorů, existují pro ně různé ekvivalenty názvů. Senzor je také nazýván jako snímač, převodník nebo detektor. Někdy bývá citlivá část senzoru označovaná jako čidlo.

Senzor lze popsat jako převodník neelektrické veličiny (fyzikální, chemické nebo biologické) na veličinu elektrickou (napětí, proud), kterou jsme schopni různými úpravami zpracovat. Existují i senzory, které umí transformovat neelektrickou veličinu na číslicový výstupní signál.

2.1 Senzory polohy

Kapitola čerpá některé citace z literatury [6].

Senzory polohy, mezi něž patří i senzory posuvu a rozměrů, se vyrábějí v rotačním nebo lineárním provedení.

Dělíme je do základních kategorií:

a) dvoustavové senzory (polohové spínače)

- kontaktní (zde patří mikrospínače a taktilní spínače)
- bezkontaktní (zde patří magnetické, optické, kapacitní, atd.)

b) senzory s binárním výstupem (zde patří inkrementální a absolutní)

- optické
- magnetické

c) senzory se spojitým výstupem

- odporové
- indukčnostní
- kapacitní
- optické
- ultrazvukové

Většina senzorů polohy se vyrábí s **dvoustavovým (binárním) výstupem**. Mohou mít tvar logického signálu, výstupu s otevřeným kolektorem nebo spínacího kontaktu. Polohové spínače mohou pracovat na mechanických principech jako je mikrospínač, jazýčkové relé, Wiegandův senzor. Další možností je použití senzoru polohy se spojitým výstupem, jako je indukčnostní senzor, kapacitní senzor, Hallův senzor, magnetorezistor, optická závora, atd., k němuž je na výstupu připojen komparátor.

Polohové spínače se také používají jako senzory úhlové polohy a rychlosti. Jako příklad použití můžeme uvést kontakt v rozdělovači spalovacího motoru. K těmto účelům se nejvíce používají magnetické senzory pro jejich robustnost a spolehlivost. Pokud nemůžeme na měřený objekt umístit permanentní magnet a navíc tento objekt není feromagnetický, budeme muset použít senzory na principu vířivých proudů. Tato situace může nastat například na hliníkových lopatkách vysokorychlostních turbín. V případě, že je měřený objekt nevodivý (např. papír, plast), používají se kapacitní nebo ultrazvukové senzory. Dalším často používaným typem senzorů, fungujících na různých principech, jsou optické senzory polohy.

V následujících kapitolách práce by nebylo účelné vysvětlovat všechny typy senzorů, budou proto popsána jenom rozdělení a principy indukčnostních senzorů polohy.

3 Indukčnostní senzory polohy

Tak jako existují různé ekvivalenty pro název kteréhokoliv senzoru, můžeme se setkat s různým označením pro indukční senzor. Různé názvosloví vyplývá z historického kontextu. Nejčastěji se používá název indukčnostní senzor [1], dále indukčnostní snímač [3], indukční senzor [4] nebo indukční převodník [5]. Pro jednotnost textu budeme používat názvu indukčnostní senzor.

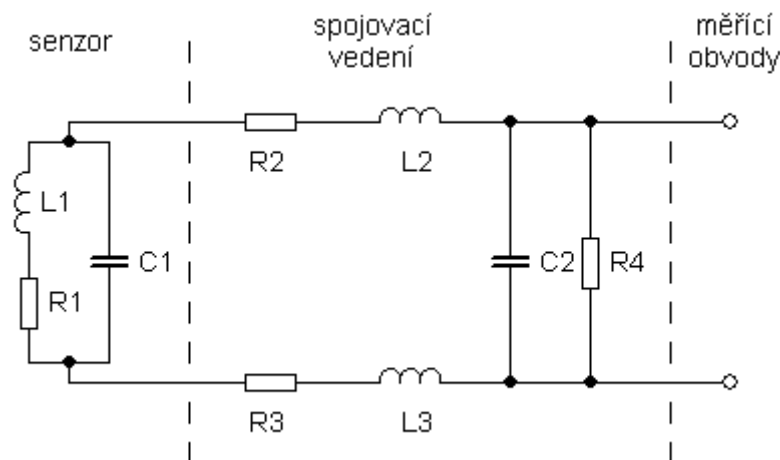
3.1 Rozbor a náhradní schéma

Podkapitola čerpající některé citace z literatury [3].

Indukčnostní senzory patří do skupiny pasivních senzorů se spojitým výstupem. Měřenou elektrickou veličinu převádí na změnu indukčnosti. Indukčnostní senzory bývají doplněny v obvodu budícím střídavým napětím. Nejčastěji se jedná o obvody můstkové nebo rezonanční. Díky těmto senzorům můžeme měřit velké množství i neelektrických veličin.

Náhradní schéma indukčnostního senzoru vidíme na obrázku (obr. 1). V levé části je umístěn samotný senzor, tvořený indukčností L_I [H], která závisí na počtu závitů l , elektrických a magnetických parametrech jádra a na rozměrech cívky a jádra. Dále je tvořen ztrátovým odporem R_I [Ω]. Třetím ovlivňujícím členem je parazitní kapacita C_I [F], která nezpůsobuje velkou chybu, neboť její reaktance X_C [Ω] je mnohem menší, než reaktance cívky při stejném kmitočtu. Ztrátový odpor je dán činným odporem vinutí cívky, dále odporem způsobeným vířivými proudy v jádru, a také ztrátami, které způsobí magnetická hystereze. Ideální indukčnostní senzor by měl mít velkou reaktanci $X_L = \omega L_I$ [Ω] v porovnání s R_I , ale za běžných provozních podmínek, při kmitočtech $f_I = 5$ až 50kHz tento požadavek není možno splnit, protože $\omega L_I \sim (1 \text{ až } 10) R_I$.

Tímto vznikne silná kmitočtová závislost, protože ωL_I je závislá na kmitočtu víc, než R_I , který je závislý na teplotě.



Obr. 1: Náhradní schéma indukčnostního senzoru

Většinu indukčnostních senzorů propojujeme spojovacím vedením (kromě speciálních senzorů na *DPS*) s měřícím obvodem. Kvalita přívodů má velký vliv na přesnost měření. Rovněž je vhodné, aby délka byla jen nezbytně nutná k připojení senzoru, aby se zbytečně neindukovala cizí napětí (např. rádiové vlny). Odpory R_2 a R_3 představují odpor vedení, cívky L_2 a L_3 indukčnost vedení. Kondenzátor C_2 kapacitu mezi vodiči a odpor R_4 izolační odpor (případně svod na vedení).

Podélné a příčné parametry spojovacího vedení ovlivňují citlivost senzoru, navíc se mění s teplotou, vlhkostí a časem (stárnutí materiálu). Podle toho se zvolí reaktance senzoru ωL_1 , aby platil vzorec (1).

$$R_{23}, \omega L_{23} \ll \omega L_1 \ll R_4, \frac{1}{\omega C_2} \quad (1)$$

3.2 Impedance senzoru

Obecný vztah pro impedanci cívky senzoru popisuje vzorec (2) z literatury (3).

$$Z(j\omega) = R + j\omega L \quad (2)$$

Následnou úpravou dosadíme do vzorce (3) z literatury [1].

$$Z(j\omega) = R + j\omega \frac{N^2}{Z_m} = R + j\omega \frac{N^2}{R_m + jX_m} = R + \frac{N^2 \omega X_m}{|Z_m(j\omega)|^2} + j \frac{N^2 \omega R_m}{|Z_m(j\omega)|^2} \quad (3)$$

R_m vyjadřuje činnou složku magnetického odporu, X_m jalovou složku magnetického odporu, $Z_m(j\omega)$ magnetickou impedanci (reluktanci) a R je ohmický odpor vinutí. První člen upraveného vzorce (3) představuje ohmický odpor vinutí cívky. Druhý člen představuje ztráty vířivými proudy a hysterezí X_m a je základem senzorů s vířivými proudy. Třetí člen představuje indukčnost a je základem senzorů s proměnnou reluktancí.

3.3 Rozdělení senzorů

a) podle základního principu

- tlumivkové
- transformátorové

b) podle provedení magnetického obvodu

- s otevřeným magnetickým obvodem
- s uzavřeným magnetickým obvodem

c) podle uspořádání snímacích prvků

- jednoduché
- diferenciální

d) podle vazby s měřeným objektem

- dotykové
- bezdotykové

Indukčnostní senzory polohy můžeme rozdělit podle čtyřech základních skupin a osmi podskupin.

Každý senzor splňuje všechny čtyři základní skupiny a následně se mu přiřazuje jedna podskupina (např.: induktivní senzor s otevřeným magnetickým obvodem s transformátorem v diferenciálním zapojení a dotykovou vazbou).

V následujících podkapitolách jednotlivých typů senzorů jsou použity (není-li uvedena jiná literatura) citace včetně obrázků a vzorců z doporučené literatury [1].

3.4 Indukčnostní senzory s proměnnou vzduchovou mezerou

Tyto senzory patří k nejvýznamnějším typům senzorů s proměnnou reluktancí, které mohou pracovat v těchto režimech:

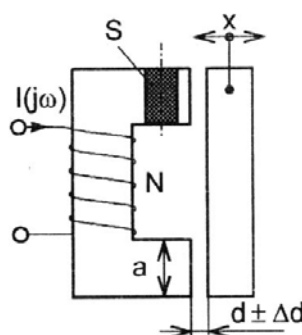
a) pohyblivá část feromagnetika

- změna velikosti vzduchové mezery
- změna plochy vzduchové mezery

b) pohyblivá cívka

3.4.1 Indukčnostní senzor mezerový

Na obrázku (obr. 2) vidíme základní uspořádání indukčnostního senzoru mezerového. Měřeným posuvem x se mění velikost vzduchové mezery v rozmezí $d \pm \Delta d$. Když je $d \ll a$, tak je možné zanedbat rozptylový tok mimo vzduchovou mezeru a také pro kmitočty do cca 10 kHz vliv ztrát ve feromagnetiku. Potom je magnetická relutance reálná a platí vzorec (4) z literatury [6].



Obr. 2: Indukčnostní senzor mezerový

$$R_m = \sum_i \frac{l_i}{\mu_i S_i} = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_r S_{Fe}} + \frac{2d}{\mu_0 S_d} \rightarrow \frac{2d}{\mu_0 S_d} \quad (4)$$

Za permeabilitu vakua μ_0 dosadíme permeabilitu feromagnetika μ_{Fe} , která je podstatně větší, než permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H.m}^{-1}$. Pro indukčnost L senzoru přibližně platí vzorec (5).

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{2d} \mu_0 S_d \quad (5)$$

Závislost L na d je **hyperbolická**, a proto se senzory s proměnnou vzduchovou mezerou používají pro měření velmi malých posuvů x .

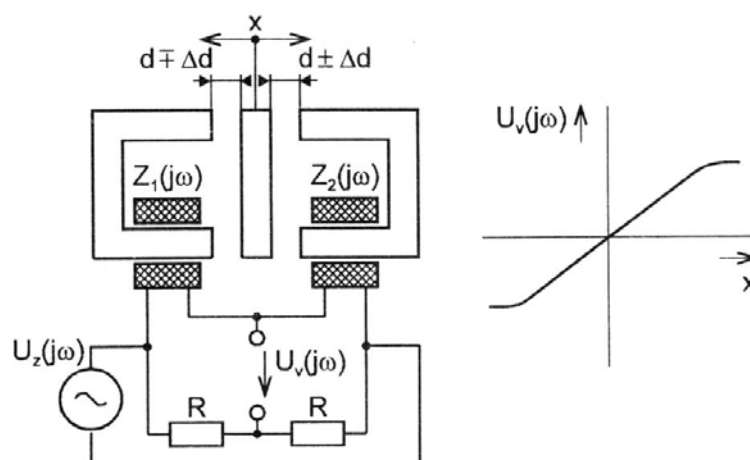
Relativní změna indukčnosti senzoru $\Delta L/L$ určuje citlivost a linearitu převodní charakteristiky. Závisí na změně klidové hodnoty vzduchové mezery o $\pm \Delta d$ a můžeme ji odvodit ze vzorce (6).

$$\Delta L = \frac{N^2 \mu_0 S_d}{2} \left(\frac{1}{d \pm \Delta d} - \frac{1}{d} \right) = L \frac{-\frac{\Delta d}{d}}{1 \pm \frac{\Delta d}{d}}; \quad \frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta d}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 - \dots \right) \quad (6)$$

Rozvoj $\Delta L/L$ v řadu platí pro $(\Delta d/d) < 1$. Skutečný průběh se aproximuje s přesností asi 1% pro $(\Delta d/d) < 0,1$. Používá se pro výpočty se senzorem, který je zapojený do můstkového obvodu, jelikož indikátorové napětí nevyváženého můstku závisí na relativní odchylce měřené impedance od rovnovážného stavu ($\Delta L=0$).

3.4.2 Diferenční indukčnostní senzor

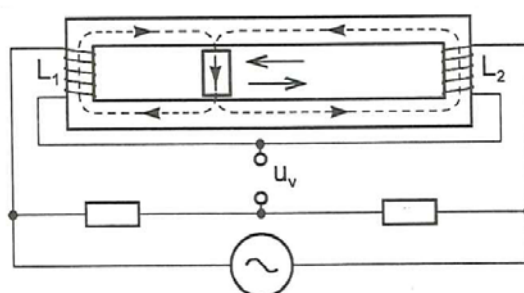
V diferenciálním uspořádání senzoru, kde při změně x v jednom směru mají hodnoty $\Delta L/L$ opačná znaménka se použitím můstkového měřicího obvodu podle obrázku (obr. 3) dosahuje dvojnásobné citlivosti a zmenšení nelinearity. To je běžnou vlastností diferenciálních uspořádání, jelikož napětí nerovnováhy můstku $U_v(j\omega)$ je úměrné rozdílu relativních změn impedancí ramen můstku. Zdrojové napětí $U_z(j\omega)$ představuje budící generátor můstkového obvodu.



Obr. 3: Diferenční indukčnostní senzor s měřícím obvodem a převodní charakteristikou

3.4.3 Diferenciální tlumivkový senzor s posuvným magnetickým zkratem

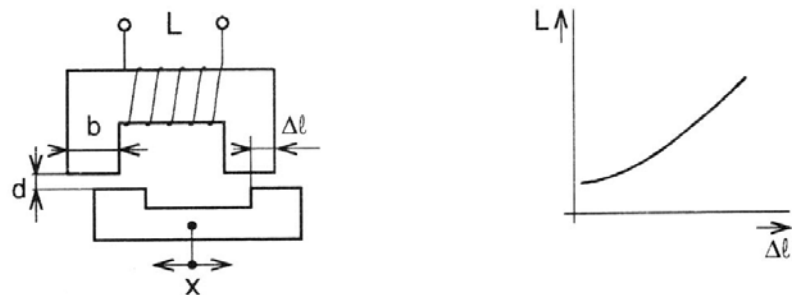
Princip funkce je na obrázku (obr. 4). Tento senzor patří rovněž mezi senzory s proměnnou délkou střední siločáry l_i . Pro střední polohu posuvného zkratu platí $L_1 = L_2 = L$ a můstek je vyvážen ($U_v = 0$). Při posouvání jádra se mění odpor magnetického obvodu pravé a levé části, tudíž se mění i dílčí magnetické toky procházející cívkami L_1 a L_2 a tím nastane rozvážení můstku.



Obr.4: Indukčnostní senzor s posuvným magnetickým zkratem

3.4.4 Senzor s proměnnou plochou vzduchové mezery

Uspořádání je na obrázku (obr. 5) je vhodný pro měření středních hodnot posuvů x . Jeho linearity lze dosáhnout pouze, je-li $x \ll b$ a $d \ll b$. Vhodná konstrukce musí zaručit, aby při posuvech x nedocházelo současně ke změnám d .



Obr. 5: Indukčnostní senzor s proměnnou plochou vzduchové mezery

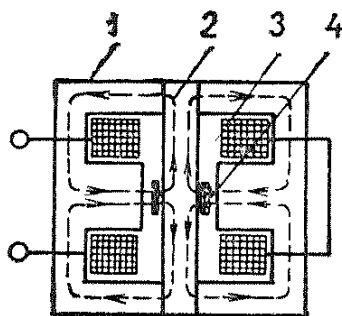
Indukčnost senzoru můžeme určit přibližně podle vzorce (7).

$$L \doteq \frac{\mu_0 S N^2}{2d} \cdot \frac{\Delta l}{b} \quad (7)$$

3.4.5 Indukčnostní senzor s pohyblivou cívkou

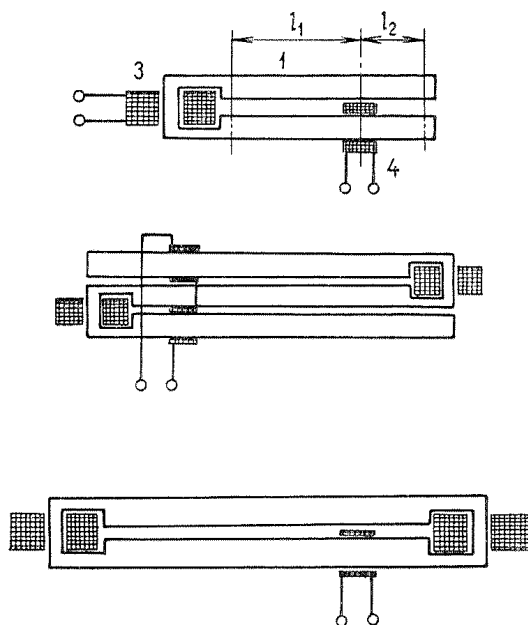
Na obrázku (obr. 6) vidíme indukčnostní senzor s pohyblivou cívkou literatura [3], který se skládá z:

- 1 - vnější části magnetického obvodu
- 2 - vnitřní části magnetického obvodu
- 3 - pevných budících cívek
- 4 - pohyblivé měřicí cívky



Obr. 6: Indukčnostní senzor s pohyblivou cívkou

Měřicí cívkou procházejí dílčí magnetické toky levé a pravé strany magnetického obvodu. Nastane-li situace, kdy je cívka uprostřed pólových nástavců, a tedy i v ose magnetické symetrie systému, potom výsledný magnetický tok působící na měřicí cívku je rovný nule. Posunutím cívky na jednu nebo druhou stranu (mimo symetrii) se zvětšuje dílčí magnetický tok, který prochází měřicí cívkou. Velikosti nesymetrie (rozdílení) je úměrné napětí na měřicí cívkce.



Obr. 7: Základní typy snímačů s pohyblivou cívkou

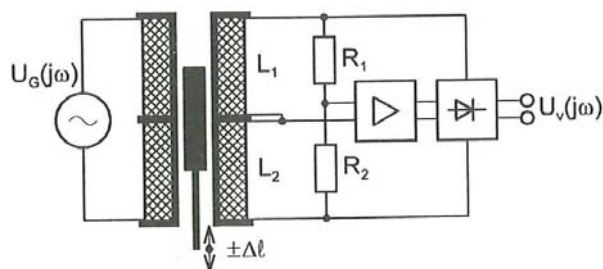
Na obrázku (obr. 7) vidíme různá provedení tohoto typu snímače, které jsou určeny pro velká posunutí. Výhodou snímačů s pohyblivou cívkou je téměř lineární charakteristika. Mezi nevýhody patří samotná konstrukce přívodů pohyblivé měřicí cívky. Na materiál přívodů se musí použít kvalitních lankových vodičů, tak aby nedošlo k jejich přetrhnutí. U tohoto typu snímačů se někdy můžeme setkat s konstrukcí závitu nakrátko, kterým je nahrazena pohyblivá měřicí cívka.

3.5 Indukčnostní senzory s otevřeným magnetickým obvodem

Patří mezi nejstarší typy senzorů a dodnes se používají pro měření polohy.

3.5.1 Diferenční indukčnostní senzor s posuvným jádrem

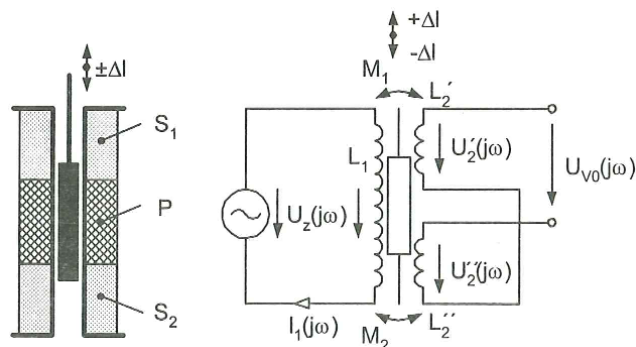
Senzor v diferenčním uspořádání je na obrázku (obr. 8). Posuv x od rovnovážné polohy se zajišťuje pomocí posuvného feromagnetického jádra, které zasahuje do poloviny délky obou cívek. K určení směru je nutné použít fázově citlivý usměrňovač (synchronní detektor). Jeho referenční napětí je odvozeno od budicího napájecího napětí můstku $U_G(j\omega)$.



Obr. 8: Diferenční indukčnostní senzor s posuvným jádrem

3.5.2 Lineární diferenční transformátorový senzor polohy LVDT

Nejrozšířenějším senzorem s otevřeným magnetickým obvodem je lineární diferenční transformátorový senzor polohy LVDT (Linear Variable Differential Transformer), který je na obrázku (obr. 9).



Obr. 9: Lineární diferenční transformátorový senzor polohy (LVDT)

Základ senzoru tvoří transformátor, u kterého se vlivem posuvu x mění vzájemná indukčnost M mezi primárním a sekundárním vinutím cívek. Primární budící cívka je napájena z generátoru napětí, takže výstupní napětí na sekundáru je úměrné měřené veličině. Výstupní napětí naprázdno sekundáru je určeno vztahem (8). Velikost primárního proudu určuje vztah (9). Jelikož jsou sekundární vinutí zapojena proti sobě, proto je napětí na výstupu senzoru určené rozdílem obou dílčích napětí podle vztahu (10).

$$U_2'(j\omega) = j\omega M_1 I_1(j\omega); \quad U_2''(j\omega) = j\omega M_2 I_1(j\omega) \quad (8)$$

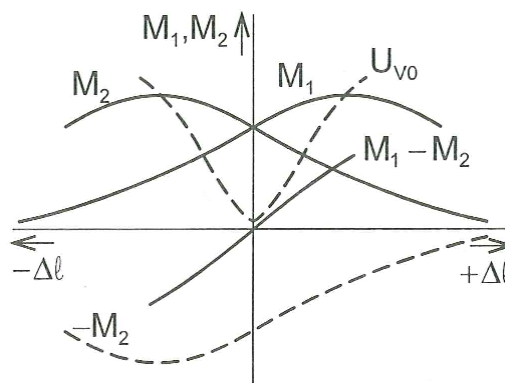
$$I_1(j\omega) = \frac{U_z(j\omega)}{R_1 + j\omega L_1} \quad (9)$$

$$U_{vo}(j\omega) = j\omega(M_1 - M_2) \frac{U_z(j\omega)}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{U_z(j\omega)}{R_1} \cdot \frac{j\omega(M_1 - M_2)}{1 + j\omega\tau} \quad (10)$$

Může se stát, že časová konstanta primárního obvodu $\tau = L_1/R_1$ je při proudovém napájení primáru ($R_1 \gg j\omega L_1$) velmi malá, potom je $U_{vo}(j\omega)$ úměrné velikosti ω . Zvýšení citlivosti se může provést zvýšením kmitočtu zdrojového napětí $U_z(j\omega)$, to však vyžaduje stabilizaci ω , tudíž je dávana přednost napětíovému napájení, kdy není $U_{vo}(j\omega)$ závislé na ω .

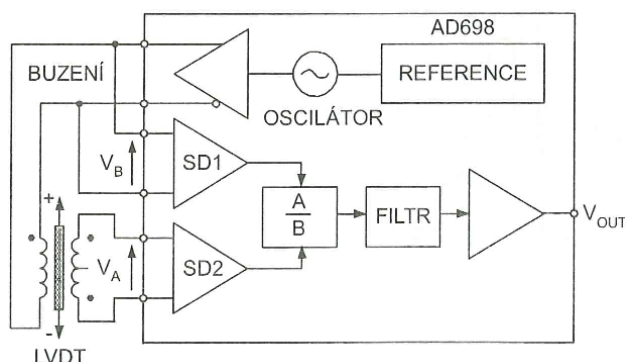
Na obrázku (obr. 10) je mimo jiné skutečná závislost $U_{vo}(j\omega)$ na posuvu od rovnovážné polohy jádra. Je zřejmé, že pro $\Delta l = 0$ je $U_{vo}(j\omega)$ nenulové i při symetrii sekundárních vinutí. To způsobují vyšší harmonické primárního proudu a parazitní kapacitní vazba mezi primárním a sekundárním vinutím.

Aby se nezmenšovalo rozlišení v okolí počátku souřadnic, což způsobuje nenulové napětí $U_{v0}(j\omega)$, používá se synchronní detekce. Potom výstupní napětí není závislé na fázově posunuté složce o 90° , kterou představuje primární napětí, které se dostane na výstup kapacitní cestou.



Obr. 10: Závislost vzájemných indukčností a výstupního napětí na poloze jádra

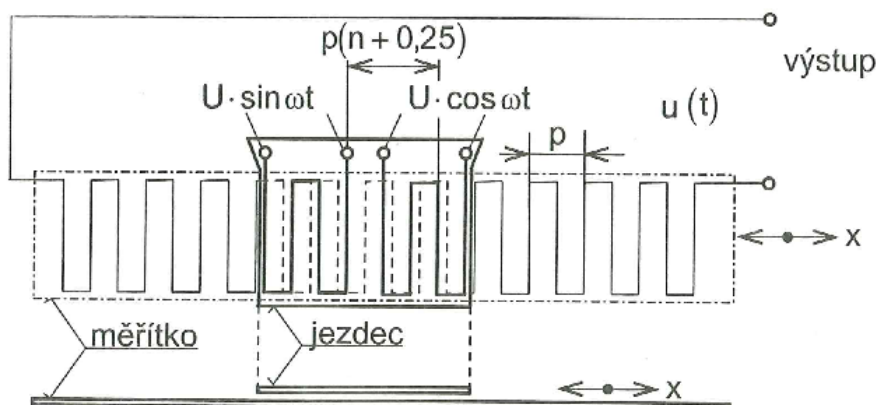
Obvody pro zpracování výstupního signálu z LVDT, stejného jako na obrázku (obr. 11) z literatury [6], často používají poměrového měřicího obvodu, který vychází z předpokladu, že při posuvu jádra se nemění součtové napětí $U_A + U_B$, což většina senzorů splňuje. Poměrový obvod potlačí kolísání amplitudy generátoru a případné fázové posuvy. Obvod AD598 firmy Analog Devices literatura [10] pro pětivodičové LVDT připojení senzorů používá dvou přesných neřízených usměrňovačů. Novější obvod AD698 též firmy literatura [11] pro 4-vodičové připojení senzoru používá dvou synchronních detektorů. První detektor se používá k měření výstupního rozdílového napětí a druhý k měření napájecího napětí. Poměr těchto napětí není závislý na kolísání amplitudy generátoru.



Obr. 11: Obvod AD698 pro LVDT

3.6 Induktosyn

Induktosyn je druh transformátorového indukčnostního senzoru, který využívá cívek vyrobených z plošných spojů. Podle obrázku (obr. 12) skládá se z měřítka a jezdce. Měřítka je primární vinutí ve tvaru meandru s velikostí kroku p na izolantu, který může být vyroben ze skla, keramiky, nemagnetického kovu s izolační vrstvou, apod. Jezdec má dvě cívky (meandry). Tvary cívek měřítka a jezdce jsou stejné, a při jejich posuvu se mění jejich vzájemná indukčnost M mezi každou z cívek a jezdce měřítka. Maximální indukované napětí nastane v situaci, když se překrývají obrazce měřítka a jezdce. V opačné situaci, kdy jsou indukované napětí a vzájemná indukčnost nulové, je vzájemný posuv čtvrt kroku $-\pi/4$. Jelikož protékají opačné proudy rovnoběžnými delšími úseky cívky jezdce a v mezilehlém úseku měřítka se indukují napětí opačné fáze, tudíž je výsledné napětí nulové. Při dalším posuvu o další čtvrtinu kroku se vinutí cívek překrývají a indukované napětí bude maximální amplitudě v opačné fázi.



Obr. 12: Princip induktosynu

Závislost indukovaného napětí na poloze x v jednom kroku vyjadřuje vzorec (11). Průběh napětí indukovaného do měřítka od jedné cívky jezdce, které je buzeno harmonickým napětím o kmitočtu ω je určen podle vzorce (12), jehož amplituda nese informaci o posuvu x/p v jednom kroku.

$$U_2 = KU \cos\left(2\pi \frac{x}{p}\right) = KU \cos \varphi \quad (11)$$

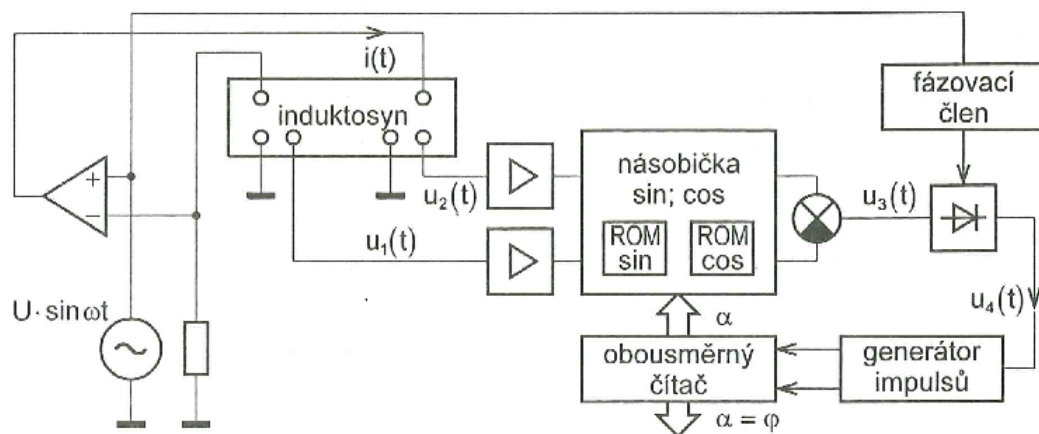
$$u_{21}(t) = KU \cos \varphi \cos \omega t \quad (12)$$

Uspořádáním se dvěma jezdci, které je napájeno harmonickými napětími posunutými o $\pi/2$, se potlačuje závislost napětí $u_{21}(t)$ na amplitudě budícího napětí U a na vzdálenosti mezi pravitkem a jezdce. Obě vinutí jsou posunuta geometricky o $n.p+p/4$. Celkové indukované napětí v měřítku je potom vyjádřeno vzorcem (13).

$$u_2(t) = u_{21}(t) + u_{22}(t) = KU(\cos \varphi \cos \omega t + \sin \varphi \sin \omega t) = KU \cos(\omega t - \varphi) \quad (13)$$

Fázový úhel φ je nyní měronosnou veličinou, která není závislá na kmitočtu a amplitudě a dá se měřit čítačem. K měření posuvů $x > p$ se v čítači registruje počet překročení úhlu 2π (hrubá stupnice) a polohy uvnitř kroku (jemná stupnice). Někdy se měří fáze i analogově s využitím fázově citlivého detektoru PSD (Phase Sensitive Detector), který je obvykle realizován synchronním detektorem.

Měřicí obvod indukotosynu s napájením do měřítka s číslicovým výstupem je na obrázku (obr. 13).



Obr. 13: Měřicí obvod indukotosynu s napájením do měřítka

Měřicí obvod je tvořen generátorem impulsů. Posuvem jezdce o φ vůči měřítku se ve vinutí sekundáru indukují napětí podle vzorce (14).

$$u_1(t) = KU \sin \varphi \sin \omega t; \quad u_2(t) = KU \cos \varphi \sin \omega t \quad (14)$$

Následným vynásobením hodnotami $\sin \alpha$ a $\cos \alpha$ v násobičce bude rozdílové napětí podle vzorce (15).

$$u_3(t) = KU(\sin \varphi \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha) \sin \omega t = KU \sin(\varphi - \alpha) \sin \omega t \quad (15)$$

Tento synchronní detektor pracuje ve funkci fázového detektoru. Jeho výstup je řízen napětím generátoru impulsů. Když je $\varphi - \alpha > 0$, potom je výstupní napětí fázového detektoru kladné a čítač zvyšuje hodnotu α . Když je $\varphi = 0$, tak se činnost oscilátoru zastaví, potom obsah čítače odpovídá hledané hodnotě φ . K zajištění správné činnosti zpětnovazebního systému je potřeba generace signálu řídicího směr čítání. Tohoto principu využívá například monolitický obvod AD2S90 od firmy Analog Devices literatura [12], kde se ve funkci násobičky používá násobící D/A převodník.

Kromě lineárních inuktosynů se používá také rotačních typů, které dosahují přesnosti úhlového stupně 0,001mm nebo 0,005mm.

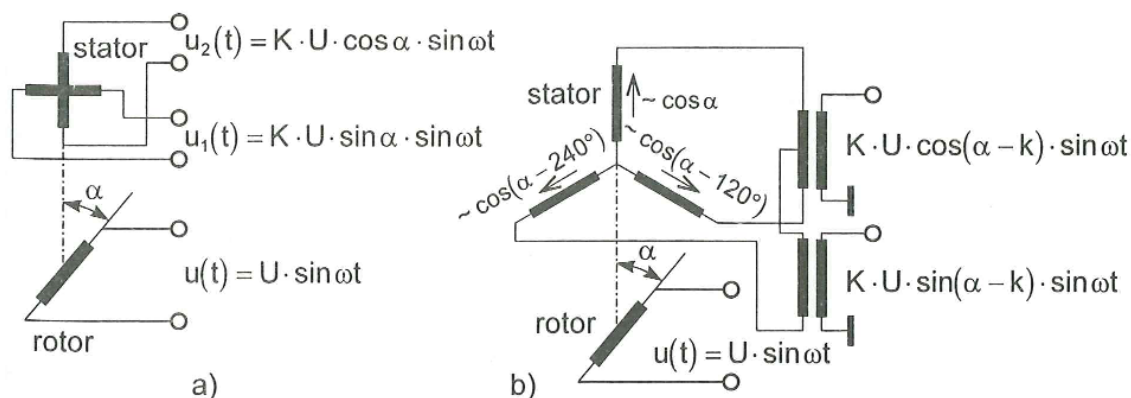
3.7 Selsyny a resolvery

Selsyny a resolvery se používají k měření úhlové polohy. Jsou složeny ze statorových a rotorových vinutí podle obrázku (obr. 14), obdobně jako elektrické asynchronní stroje. Mají velké výstupní napětí a jsou vyráběny ve velkých rozměrech.

Resolver má dvoufázové vinutí statoru a jednofázové vinutí rotoru. Magnetickým polem rotoru se indukuje ve statorových vinutích napětí, jejichž amplitudy jsou závislé na úhlu natočení rotoru α . Pro vyhodnocení těchto napětí se používají obvody stejné, jako u inuktosynu (resolver to digital converter).

Selsyn má trojfázové vinutí statoru a jednofázové vinutí rotoru.

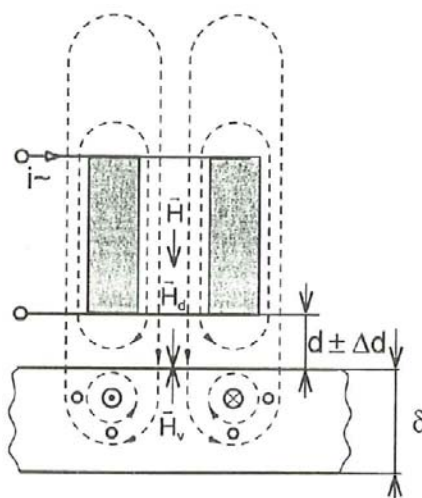
Pro přenos úhlové polohy nebo její dálkové ovládání z vysílacího místa na indikátor (funguje jako ohebná hřídel), se používá dvojice selsynů napájených do spojených rotorů a s propojenými statorovými vinutími. Toto zapojení se používá například pro natáčení antén.



Obr. 14: a) Resolver, b) selsyn s napájením do rotoru

3.8 Indukčnostní senzory na principu vířivých proudů

Tyto senzory patří mezi nejrozšířenější indukčnostní senzory na trhu. Princip indukčnostních senzorů s vířivými proudy vidíme na obrázku (obr. 15). Vířivé proudy vyvolává střídavé magnetické pole cívky H a vyvolají v materiálu s rezistivitou ρ a permeabilitou μ sekundární magnetické pole o intenzitě H_v , které působí proti poli, které je vyvolalo (podle Lenzova zákona). Tím se zmenšuje intenzita původního pole, podle toho se někdy můžeme setkat s názvem indukčnostní snímač s potlačeným polem, např. literatura [3]. V důsledku zmenšení pole se zmenšuje indukčnost budící cívky (zmenšil se magnetický tok Φ) a dochází ke zvýšení ztrát v cívce, protože část energie se spotřebovává ohřevem materiálu.



Obr. 15: Princip indukčnostních senzorů s vířivými proudy

Intenzita povrchového jevu se popisuje hloubkou vniku podle vzorce (16). Malá hloubka vniku odpovídá velké hustotě vířivých proudů v objektu.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (16)$$

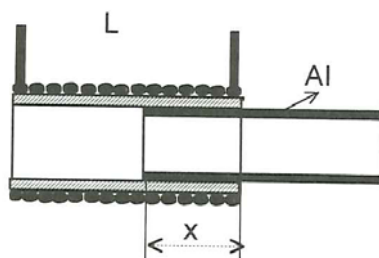
Fyzikálně δ odpovídá vzdálenosti pod povrchem vodivého tělesa, ve kterém se utlumí magnetické pole na $1/e=37\%$ intenzity na povrchu, literatura [6]. Použitím senzoru pro měření vzdálenosti se volí ω tak, aby naměřený údaj byl nezávislý na tloušťce měřeného objektu d , čili $d \gg \delta$.

Intenzita pole H pronikajícího do objektu je závislá na vzdálenosti cívky od objektu. Díky tomu jsou indukčnostní senzory polohy s vířivými proudy jedním z hlavních prostředků pro bezdotykové měření vzdálenosti, tloušťky vodivých vrstev a detekce kovových objektů.

Na obrázku (obr.16) je senzor založený na změně indukčnosti solenoidu při zasouvání hliníkové trubky. Vhodně zvoleným kmitočtem se účinek vířivých proudů v trubce projevuje změnou indukčnosti. Změna reálné složky impedance je asi o řád menší. Dobrou linearitu (0,1%) má závislost úbytku napětí na indukčnosti, při posuvu x hliníkovou (značka Al) trubkou. Měřené zdvihy mohou dosahovat až stovky milimetrů.

Výstupní napětí tvaru amplitudové modulace se usměrní a vyhladí dolnofrekvenční propustí.

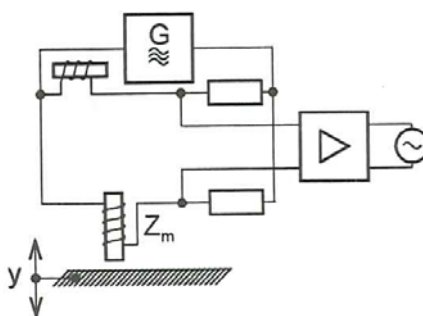
Tyto senzory mají lepší dynamické vlastnosti, než sice přesné, ale pomalé LVDT, které měří asi o dva řády pomalejší jevy.



Obr. 16: Senzor posuvu na principu vířivých proudů

Vyhodnocovací obvody senzorů s vířivými proudy mohou být analogové nebo s dvoustavovým výstupem (polohové spínače). Mezi analogové vyhodnocovací obvody patří jednoduchý snímač s můstkovým měřicím obvodem, který je na obrázku (obr. 17). Typickým prvkem v zapojení je kompenzační senzor, který není ovlivňován měřeným objektem a má stejné parametry jako měřicí senzor bez přítomnosti měřeného objektu.

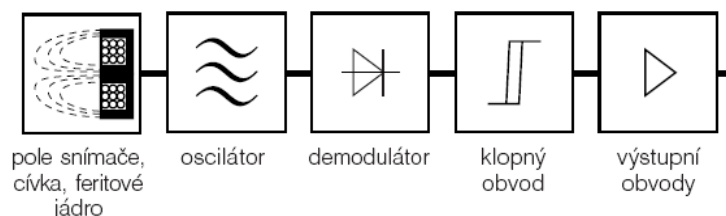
Analogové výstupy senzorů s vířivými proudy bývají třídrátové, tedy aktivní, a to buď napěťové (0 až 10V), nebo proudové (0 až 20mA). Dvoudrátových pasivních proudových výstupů (4 až 20mA) se moc nepoužívá, literatura [4].



Obr. 17: Měřicí obvod indukčnostních senzorů s vířivými proudy

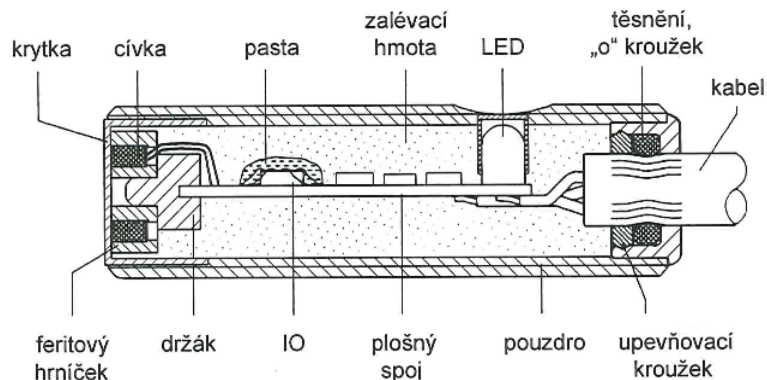
Dvoustavový vyhodnocovací obvod je na obrázku (obr. 18) z literatury [15]. Opět základ tvoří oscilátor, který budí magnetické pole cívky.

Vložení předmětu před cívku se v něm vytvářejí vířivé proudy, které tlumí kmitání oscilátoru. Dojde k rozladění oscilátoru, jehož výstupní signál je demodulován. Klopný obvod tento signál porovnává s nastavenou prahovou hodnotou, a v případě přítomnosti předmětu před cívku překlopí. Výstupní obvody slouží k upravení signálu z čidla na požadovanou úroveň výstupního napětí. Základní rozdělení senzorů podle napájení je na stejnosměrné DC výstupy, střídavé AC výstupy nebo jejich kombinace AC a AC/DC, které mohou být vytvořeny spínacím, rozpínacím případně přepojovacím kontaktem pomocí tranzistorů PNP a NPN. Různé typy připojení lze kombinovat v zapojení 2, 3 nebo 4-drát.



Obr. 18: Typická konstrukce indukčnostního senzoru s vířivými proudy

Senzory s vířivými proudy mohou být provedeny ve válcovém nebo kvádrovém tvaru. Válcové senzory, jako je na obrázku (obr. 19), mohou mít pouzdro vyrobeno z plastu nebo z kovu (chromovaná mosaz, nerezocel). Mohou být v provedení hladkém nebo se závitem (závitová tyč). Snímací část senzoru je chráněna plastovou krytkou. Svítivá dioda LED slouží k indikaci stavu sepnutí. Vnitřní prostor senzoru je zalitý hmotou, která ho chrání před případnými nepříznivými vlivy (např. vibrace). Tento senzor je vybaven kabelovým zakončením. Senzory se vyrábějí také s konektorem nebo u kvádrových tvarů se šroubovací svorkovnicí.

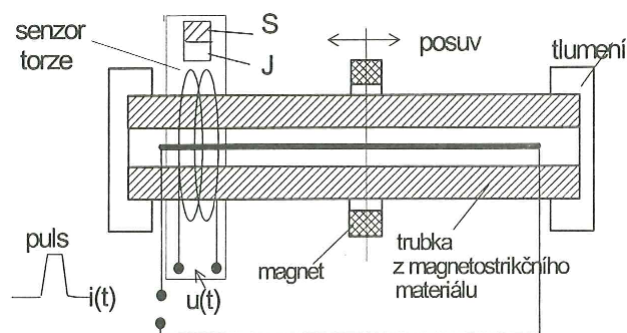


Obr. 19 Vnitřní uspořádání válcového senzoru

3.9 Magnetostrikční senzory polohy

Základem těchto senzorů je magnetostrikční zpožďovací linka, která je z trubky z magnetostrikčního materiálu podle obrázku (obr. 20). Osou trubky prochází vodič, který je napájený impulsy proudu. S pohybem měřeného objektu se také pohybuje prstencový magnet navlečený na trubce. Impuls kroutícího momentu vytvoří axiální pole prstence a kruhové magnetické pole vodiče. Tento impuls se šíří ke koncům trubky, kde se utlumí.

Změna magnetické reluktance trubky vyvolaná mechanickou deformací generuje na výstupu indukčnostního senzoru torze napěťový impuls $u(t)$. Poloha v číslicovém tvaru se určí pomocí rychlosti šíření mechanického rozruchu v materiálu trubky (bývá kolem 3000m/s) a doby mezi budícím $i(t)$ a výstupním $u(t)$ impulsem. Opakovatelnost je větší než 0,002%, nelinearita je větší než 0,05% a malá přestavná síla v kombinaci měřit velké posuvy až 5m podle literatury [6] řadí tyto senzory mezi perspektivní typy. Dalšími modifikacemi tohoto senzoru může být použití vodivého magnetostrikčního drátu místo trubky, užití jiného detektoru torze, odražený puls se používá ke kompenzaci teplotní závislosti rychlosti šíření, která bývá značná.



Obr. 20: Magnetostrikční senzor polohy

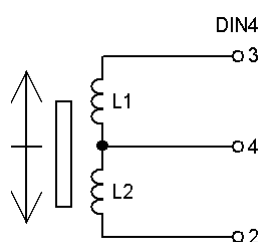
4 Návrh vyhodnocovacího obvodu pro indukčnostní senzor

V návrhu vyhodnocovacího obvodu jsou použity citace z literatury [7].

4.1 Indukčnostní senzor MS/1275

Pro senzor polohy je použit indukčnostní senzor MS/1275 na obrázku (obr. 21). Tento senzor se připojuje konektorem typu DIN4. Parametry senzoru podle literatury [7] jsou rozepsány v následujícím přehledu.

Rozsah linearity:	1 %	$\pm 5 \text{ mm}$
	2,5 %	$\pm 7 \text{ mm}$
Citlivost:	0,03 mV/ μm	
Plný výstupní rozsah:	$\pm 8 \mu\text{m}$	
Rozlišení:	0,08 μm	
Impedance:	2 x 750 Ω	
Činný odpor:	2 x 368 Ω	
Indukčnost:	2 x 13 mH	
Optimální napájení:	10 V při 8 kHz	

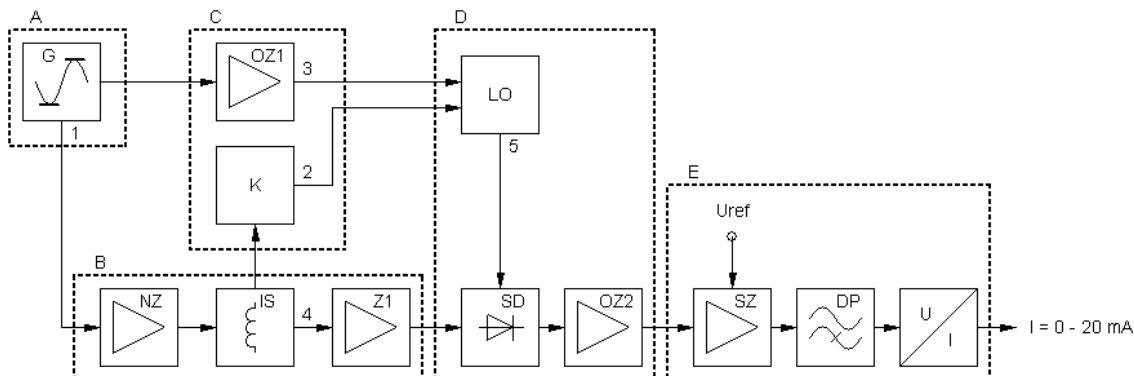


Obr. 21: Indukčnostní snímač MS/1275

4.2 Blokové schéma

Blokové schéma vyhodnocovacího obvodu pro indukčnostní senzor je na obrázku (obr. 22). Podrobné schéma zapojení je v příloze I.

Průběhy napětí v jednotlivých částech obvodu, které jsou označeny číslicemi 1 až 5, jsou uvedeny v příloze II.



Obr. 22: Blokové schéma vyhodnocovacího obvodu

Funkční význam bloků:

- A G - generátor průběhu sinus a obdélník
- B NZ - napájecí zesilovač, IS - indukčnostní senzor, Z1 - zesilovač 1
- C OZ1 - oddělovací zesilovač 1, K - komparátor
- D LO - logický obvod, SD - synchronní detektor, OZ2 - oddělovací zesilovač 2
- E SZ - součtový zesilovač, DP - dolní propust, U / I - převodník napětí / proud

Princip funkce:

V bloku A je generován harmonický sinusový průběh 8kHz s konstantní amplitudou 5V. Tento průběh (ve schématu 1) vstupuje v bloku B do napájecího zesilovače NZ, kde je neinvertující zesilovač, který má funkci napěťového zesilovače. Invertující zesilovač má zesílení -1 a posunuje fázi výstupního napětí vůči vstupnímu o 180° . Tímto obvodovým řešením je zaručena amplituda (rozkmit) 10V na měřicím můstku, ke kterému je připojen indukčnostní senzor IS. Posunutím jádra senzoru se mění indukčnosti cívek L_1 a L_2 a dojde k rozvážení můstku. Výstupní napětí (ve schématu 4) ze středu cívek je zesíleno zesilovačem Z1.

Druhou funkcí bloku A je generovat obdélníkový průběh 8Khz, který jde na vstup napěťového sledovače OZ1 v bloku C, který slouží k oddělení od logického obvodu LO. Komparátor K slouží k úpravě invertovaného napětí z bloku B na napětí logických úrovní pro logický obvod LO. Logický obvod LO v bloku

D slouží k řízení synchronního detektoru SD (řízeného přepínače) v požadovaných intervalech tak, aby bylo zajištěno, že bude odečítat maximální hodnotu výstupního napětí můstku za zesilovačem Z1.

Oddělovací zesilovač OZ2 má velký vstupní odpor, aby nezatěžoval výstup synchronního detektoru. V bloku D se upravuje výstupní usměrněné napětí za zesilovačem OZ2, které nabývá obou polarit. V součtovém zesilovači SZ se sčítá s nastavitelným referenčním napětím U_{ref} , aby jeho výstupní úroveň byla v rozsahu 0 až 10V. Aby se zabránilo rušení vysokofrekvenčních složek, je v bloku E zařazen filtr typu dolní propust, který má zároveň funkci vyhlazení výstupního napětí ze součtového zesilovače. Poslední částí obvodu je převodník napětí 0 až 10V na proudovou smyčku 0 až 20mA, která se používá pro měřicí účely.

4.3 Blok A

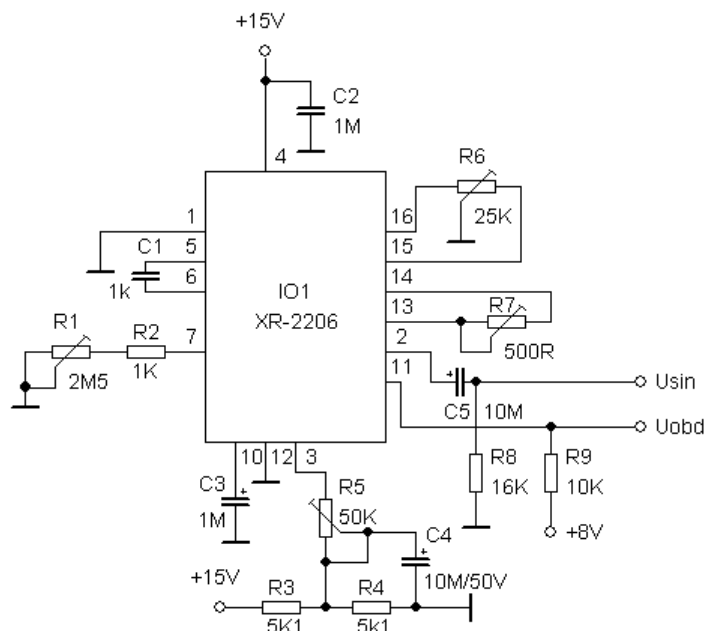
Schéma zapojení bloku A je na obrázku (obr. 23). Generátor *IOI* je zapojen podle firemního doporučení literatura [8]. Jedná se o generátor funkcí sinus nebo trojúhelník a obdélník. Jeho napájecí napětí se pohybuje v rozmezí 10V až 26V, v našem případě je to nesymetrické napětí +15V. Typická teplotní stabilita udávaná výrobcem je $\pm 0,020\text{mV}/^\circ\text{C}$. Harmonické zkreslení je 0,5%.

Pro vyhodnocovací obvod používáme průběh napětí sinus U_{sin} pro napájení měřicího můstku a obdélník U_{obd} pro spouštění synchronního detektoru. Kmitočet oscilátoru $f_0 = 8\text{kHz}$ je dán vzorcem (17). Jemné doladění je možné provést trimrem R_1 . Amplituda výstupního napětí je nastavená trimrem R_5 na hodnotu $U_{sin} = 5\text{V}$.

$$f_0 = \frac{1}{(R_1 + R_2)C_1} \quad [\text{Hz}; \Omega, F] \quad (17)$$

Trimr R_6 slouží k případnému vyrovnání symetrie průběhu U_{sin} a trimr R_7 ke snížení harmonického zkreslení. Kondenzátor C_5 s rezistorem R_8 oddělují stejnosměrnou složku výstupního napětí U_{sin} . Dolní kmitočet je nastaven přibližně na 1Hz podle vzorce (18) z literatury [2].

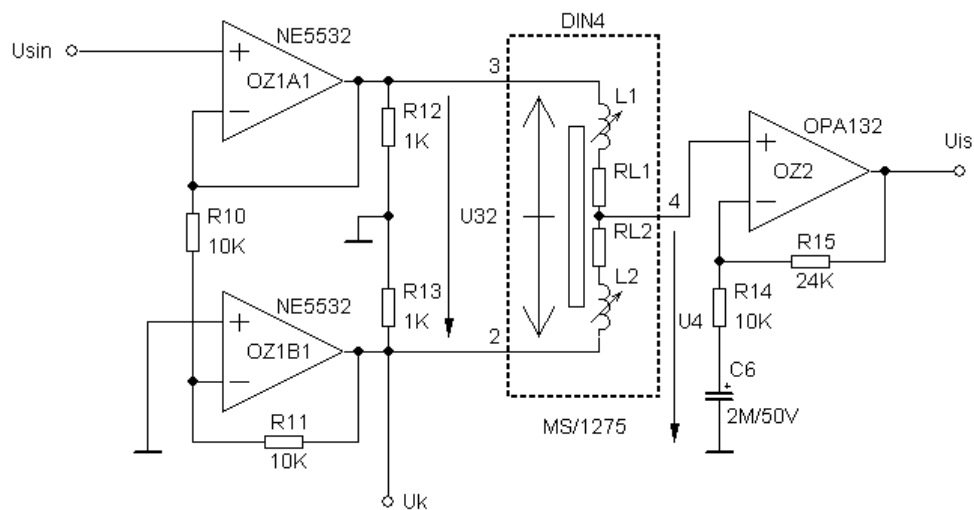
$$f_d = \frac{1}{1 + R_8 C_5} \quad [Hz; \Omega, F] \quad (18)$$



Obr. 23: Schéma zapojení bloku A

4.4 Blok B

Schéma zapojení bloku B je na obrázku (obr. 24). Napájecí zesilovač měřícího můstku je vytvořen operačním zesilovačem *OZI*. Je použitý typ NE5532 od firmy Texas Instruments, literatura [9], který má v jednom pouzdře dva operační zesilovače. Vyznačuje se nízkým šumem $5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ pro 1kHz . Napájecí napětí je $\pm 15\text{V}$, maximální vstupní klidový proud 200nA , napájecí proud $\pm 8\text{mA}$, mezní kmitočet 10MHz , vstupní odpor $300\text{k}\Omega$ a rychlost přeběhu $SR = 9\text{V}/\mu\text{s}$.



Obr. 24: Schéma zapojení bloku B

Operační zesilovač *OZ1A* je v zapojení napěťového sledovače. Jeho výstupní napětí má stejnou fázi jako vstupní napětí. *OZ1B* je v invertujícím zapojení, tudíž jeho výstupní napětí je fázově posunuté o 180° proti vstupnímu napětí, se zesílením $A_{1B} = -1$. Rezistory $R_{10} = R_{11} = 10k\Omega$ podle literatury [13]. Vstupní napětí U_{in} má amplitudu 5V a napětí U_{32} má amplitudu 10V, které je doporučené pro napájení indukčnostního snímače. Rezistory $R_{12} = R_{13} = 1k\Omega$ tvoří umělou zem, která společně s indukčnostním snímačem tvoří měřicí můstek. Změnou indukčností L_1 a L_2 se rozladí měřicí můstek, ze kterého je odebíráno napětí U_4 . *OZ5* upravuje zesílení a zároveň slouží k oddělení následujícího stupně. Je zde použitý kvalitní operační zesilovač OPA132 firmy Burr-Brown, literatura [14], která ho vyrábí pro firmu Texas Instruments. Mezi jeho přednosti patří velký vstupní odpor, aby co nejméně zatěžoval měřicí můstek. Vstupní klidový proud je maximálně 50pA, mezní kmitočet 8Mhz, rychlost přeběhu $SR = 20V/\mu s$, šumové napětí $8nV/\sqrt{Hz}$ a nízké zkreslení 0,00008%.

Následné odvození a vzorce jsou citovány z literatury [7].

Vzorec (19) byl získán pomocí programu pro symbolickou analýzu lineárních obvodů SNAP v2.6.

$$\frac{U_4}{U_{32}} = \frac{j\omega(L_2 - L_1)}{4R_{L1} + S(2L_1 + 2L_2)} \quad (19)$$

Po vyváženém můstku je $U_4=0$, indukčnost $L=L_1=L_2=13mH$ a $R_L=R_{L1}=R_{L2}=368\Omega$. Změna fáze napětí U_4 je dána vzorci (20) a (21). Po úpravě vzorce (19) je určeno napětí můstku U_4 ze vzorce (22).

$$L_1 = L + \Delta L \quad (20)$$

$$L_2 = L - \Delta L \quad (21)$$

$$U_4 = \frac{U_{32}}{2} \frac{j\omega\Delta L}{R_L + j\omega L} \quad (22)$$

Napětí u_4 při vyváženém můstku lze určit úpravou vzorce (22). Velikost změny je závislá na změně indukčnosti ΔL ve vzorci (23), následným zkrácením určíme vzorcem (24) změnu Δu_4 .

$$u_4 = |U_4| = \frac{\omega U_{32}}{2\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \Delta L \quad [V; rad/s, V, H, \Omega, rad/s, H] \quad (23)$$

$$\Delta u_4 = \frac{\pi f U_{32}}{\sqrt{R_L^2 + (2\pi f L)^2}} \Delta L \quad (24)$$

Vzorec (25) vyjadřuje změnu indukčnosti ΔL , která je závislá na konstantě a změně polohy jádra Δl indukčnostního senzoru.

$$\Delta L = K_{LS} \Delta l \quad [H; H/m, m] \quad (25)$$

Konečná závislost napětí u_4 je odvozena dosazením vzorce (25) do vzorce (24). Je vyjádřena vzorcem (26) a platí pro ni $\Delta l = l$.

$$u_4 = \frac{\pi f K_{LS} U_{32}}{\sqrt{R_L^2 + (2\pi f L)^2}} l \quad [V; Hz, H / m, V, m, \Omega, Hz, H] \quad (26)$$

Pro citlivost můstku se senzorem, při které je $f = konst.$, $U_{32} = konst.$ a $R_{L(f)} = konst.$ platí vzorec (27). Dosazením vyjádřené citlivosti K_{Lm} do vzorce (26) se získá vzorec (28).

$$K_{Lm} = \frac{\pi f K_{LS}}{\sqrt{R_L^2 + (2\pi f L)^2}} \quad [V / m] \quad (27)$$

$$u_4 = K_{Lm} U_{32} l \quad [V; V / m, V, m] \quad (28)$$

Výrobce udávaná citlivost senzoru MS1275 je $K_{Lm} = 0,03 mV/\mu m$ při frekvenci 8kHz. Optimální napájecí napětí senzoru je $U_{32} = 10V$. Linearita senzoru je 1% v délce $l = 5mm$. Maximální napětí $u_4 = 1,5V$ senzoru se určí dosazením těchto hodnot do vzorce (28).

Úpravou vzorce (27) můžeme určit velikost konstanty senzoru pomocí vzorce (29), kde Z_S je impedance indukčnostního senzoru.

$$K_{LS} = \frac{K_{Lm} Z_S}{\pi f} \quad [H / m; V / m, \Omega, Hz] \quad (29)$$

Dosazením impedance $Z_S = 750\Omega$ a kmitočtu $f = 8kHz$ do vzorce (29) je konstanta senzoru $K_{LS} = 895 \cdot 10^{-6} mH/\mu m$. Při změně polohy jádra snímače se podle vzorce (25) změní indukčnost $\Delta L = 4,475mH$. Vzorec (30) a vzorec (31) je obdobně napsaný jako vzorec (20) a vzorec (21), potom platí $L_1 = 8,52mH$ a $L_2 = 17,48mH$.

$$L_1 = L - \Delta L \quad (20)$$

$$L_2 = L + \Delta L \quad (21)$$

Výstupní zesilovač měřicího můstku *OZ2* má za úkol zesílit napětí $u_4 = 1,5V$ na $U_{is} = 5V$, bude mít tedy zesílení $A_4 = 3,33$. Rezistor R_{14} je zvolený a ze vzorce (22) z literatury [13] je vypočten $R_{15} = 23,33k\Omega$, který je zaokrouhlený do odporové řady E24 na hodnotu $R_{15} = 24k\Omega$. Zesilování stejnosměrné složky střídavého napětí zabraňuje kondenzátor $C_6 = 2,2\mu F$, který je vypočten podle vzorce (23). Zvolená zlomová frekvence je $f_{zlom} = 10Hz$.

$$A_2 = \left(1 + \frac{R_{15}}{R_{14}} \right) \quad (22)$$

$$C_6 = \frac{1}{2\pi R_{14} f_{zlom}} \quad [F; \Omega, Hz] \quad (23)$$

4.5 Blok C

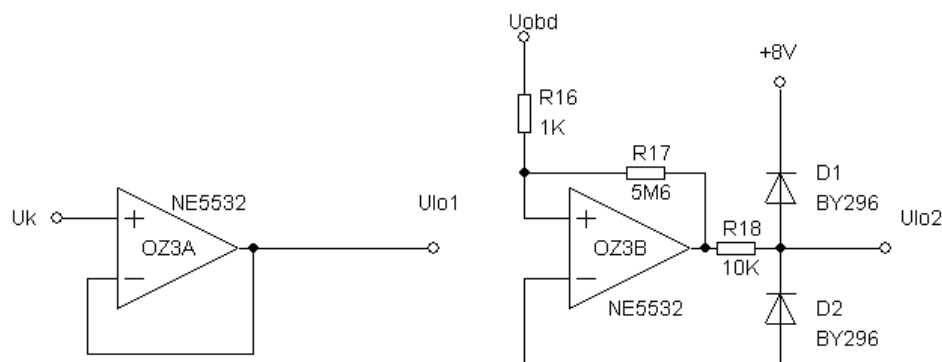
Schéma zapojení vidíme na obrázku (obr. 25). Operační zesilovač *OZ3A* je ve funkci napěťového sledovače, který má za úkol impedančně oddělit napětí z generátoru U_{obd} od napětí U_{lol} řídicího logické obvodu NAND.

Operační zesilovač *OZ3B* slouží jako komparátor nuly s hysterezí. Výstupní polarita saturačního napětí $U_{sat} = \pm 14V$ sleduje vstupní napětí U_k . Napěťová hystereze vstupního napětí $U_H = 5mV$. Rezistor $R_{16} = 1k\Omega$ je vhodně zvolený tak, aby se podle vzorce (24) z literatury [2] mohla vypočíst hodnota rezistoru $R_{17} = 5,6M\Omega$. Rozdílu napětí $(U_{2H} - U_{2L}) = 28V$ odpovídá dvojnásobek saturačního napětí operačního zesilovače *OZ3B*.

$$U_H = \frac{R_{16}}{R_{17}} (U_{2H} - U_{2L}) \quad (24)$$

Diody D_1 a D_2 spolu s rezistorem R_{15} tvoří amplitudový omezovač. Rezistor $R_{15} = 10k\Omega$ je dostatečně veliký, jelikož napětí U_{lo2} slouží jen k ovládání hradla s velkou vstupní impedancí,

neboť je vyrobený technologií CMOS. Dioda D_1 omezuje amplitudu na hodnotu napětí $U_{lo2}=8,6V$, které je dáno součtem napájecího napětí zdroje 8V a práhovým napětím diody v propustném směru 0,6V. Diodou D_2 se omezuje záporná půlvlna na hodnotu napětí $U_k=-0,6V$. Diody D_1 a D_2 jsou typu BY296 od firmy Diotec Semiconductor, literatura [16]. Jedná se o rychlé diody se zotavovací dobou $<500ns$, s maximálním proudem $I_{FAV}=2A$. Maximální proud z $OZ3B$ nepřekročí 1mA.



Obr. 25: Schéma bloku C

4.6 Blok D

Na obrázku (obr. 26) je synchronní detektor upravený dobou snímání pro vyhodnocení maximální hodnoty měřeného napětí. Skládá se z IO3 a kondenzátorů C_8 a C_9 . IO3 se řídí logickou funkcí podle vzorce (25), která je sestavena z pravdivostní tabulky (tabulka 1). Logickou funkci U_{lo3} vykonává integrovaný obvod IO2 pomocí tří hradel NAND. Tento integrovaný obvod může pracovat s napájecím napětím od 3 do 18V. Pro logickou 0 nesmí mít na vstupu napětí větší než 2V. Naopak pro logickou 1 nesmí napětí na vstupu být menší, než 4,5V.

$$U_{lo3} = \overline{\overline{U_{lo1}} U_{lo2}} \quad (25)$$

U_{lo1}	U_{lo2}	U_{lo3}
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	0

Tabulka 1: Pravdivostní tabulka

Integrovaný obvod IO3 má v sobě zabudovány tři analogové přepínače, které mohou zpracovávat signály v rozsahu napájecího napětí, jehož hodnota je 20V pro nesymetrické napájení nebo $\pm 10V$ pro symetrické napájení. V katalogu je uvedený maximální odpor jednoho přepínače 240Ω , literatura [17]. Paralelním spojením všech přepínačů bude výsledný odpor 80Ω .

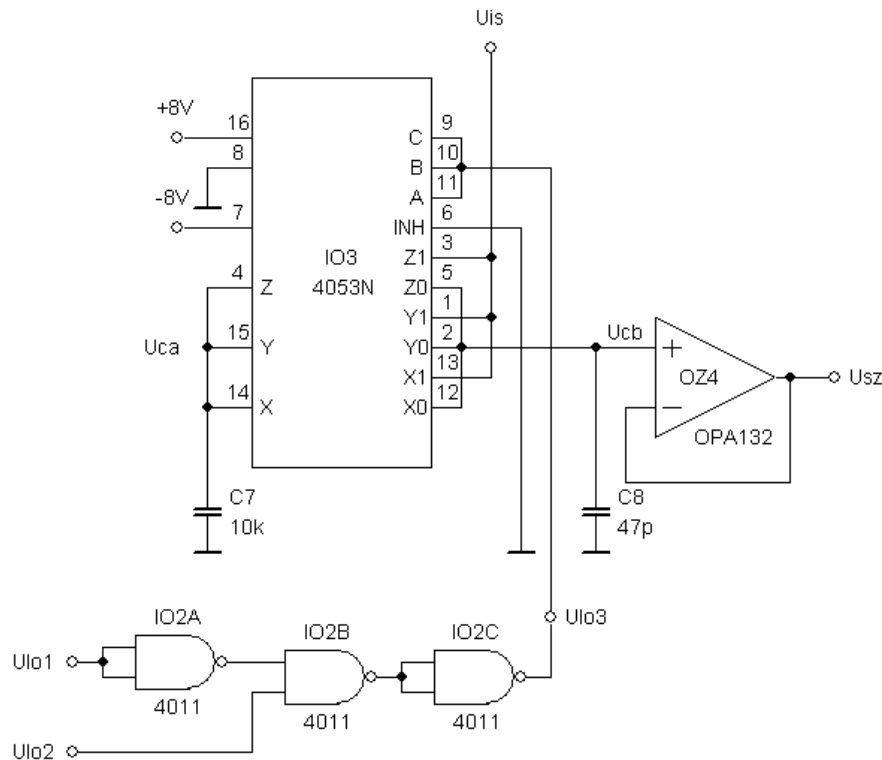
Kondenzátor C_7 se nabíjí na napětí U_{is} , když je napětí U_{lo3} v logické jedničce. Napětí U_{ca} se mění s časovou konstantou danou vnitřním odporem přepínače v IO3 a také s výstupním dynamickým odporem operačního zesilovače OZ4. Zvolený výsledný odpor $R_{celk}=100\Omega$. Kondenzátor je nabíjen po dobu $\Delta t_1=125\mu s$, při logické jedničce na výstupu U_{lo3} . Za tento čas musí nastat rovnost $U_{ca}=U_{is}$, proto je zvolena časová konstanta $5\mu s$ pro kondenzátor C_7 s rezistorem $R_{celk}=100\Omega$. Touto konstantou se určí velikost kondenzátoru $C_7=8nF$, po dosazení do řady E12 bude $C_8=10nF$. Při přepnutí U_{lo3} do logické nuly se začne přelévát elektrický náboj z C_7 do kondenzátoru C_8 . Kondenzátor C_8 slouží jako analogová paměť. Napětí U_{cb} se podle vzorce (26) může změnit v poměru k U_{ca} nejvíc o 1%.

$$\frac{U_{ca}}{U_{cb}} = \frac{C_7 + C_8}{C_7} \quad (26)$$

$$\Delta U_{cb} = \frac{I_{ib}}{C_8} \Delta t_1 \quad [V; A, s, F] \quad (27)$$

Ze vzorce (26) je získána maximální kapacita kondenzátoru $C_8 \leq 100pF$, který je připojen na neinvertující vstup napěťového sledovače OZ4 s velkou vstupní impedancí a nízkým vstupním proudem. Když je U_{lo3} v logické jedničce, tak napětí U_{cb} na kondenzátoru C_8 se může změnit

maximálně o 1% z nejvyššího možného napětí na C_8 , které je 5V. Ze vzorce (27) je vypočtena minimální kapacita kondenzátoru $C_8 \geq 0,2pF$. Dosazení do řady E12 pak bude jeho hodnota $C_8 = 47pF$.



Obr. 26: Schéma bloku D

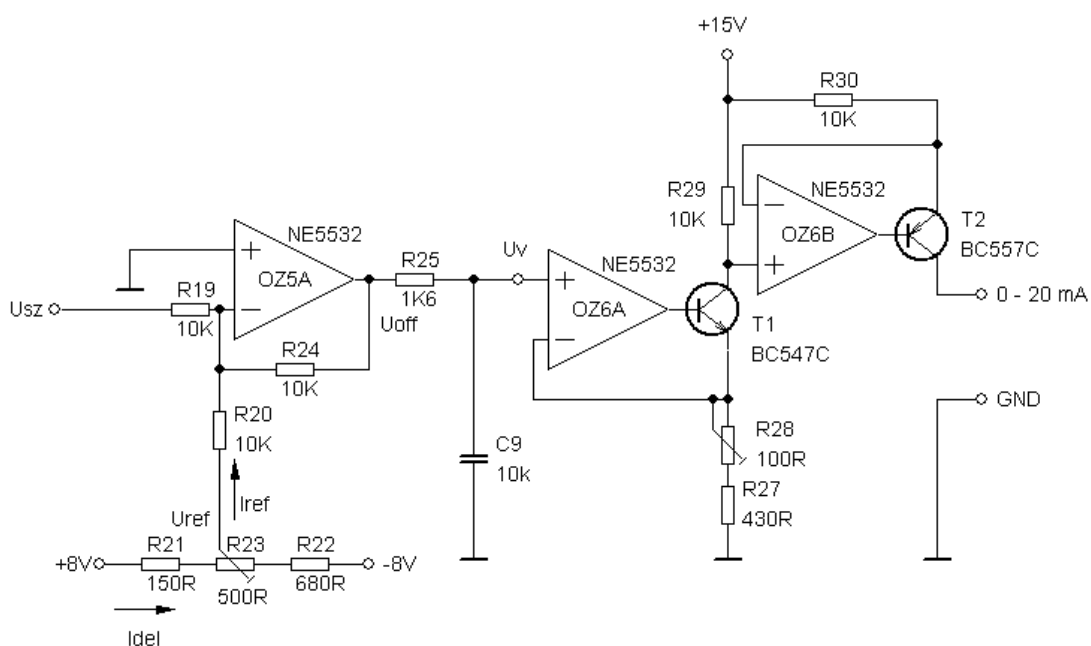
4.7 Blok E

Schéma zapojení bloku E je na obrázku (obr.27). Napětí U_{sz} se pohybuje v rozmezí $\pm 5V$. Pomocí součtového zesilovače OZ5A ho upravíme na hodnotu 0 až 10V, která slouží k jednoduššímu převodu na proudovou smyčku. Zvolené rezistory R_{19} , R_{20} , R_{24} mají shodnou velikost 10k Ω . Z napěťového děliče je odebírán proud I_{ref} , jehož maximální hodnota je určena rezistorem R_{20} a maximálním napětím $U_{ref} = 6V$ na hodnotu 0,6mA. Napětí U_{ref} je nastavitelné v rozmezí 1 až 6V. Napětí U_{off} je popsáno vzorcem (28) z literatury [13].

Proud $I_{de}=12mA$, který teče odporovým děličem, je zvolený 20x vyšší, než proud $I_{ref}=0,6mA$. Proud musí být dostatečně velký, aby napětí U_{ref} nebylo ovlivňováno změnou proudu I_{ref} . Celkový odpor děliče $R_{del}=1333\Omega$ je určený z Ohmova zákona, taktéž i další rezistory děliče. $R_{21}=166\Omega$ má po dosazení do odporové řady E24 hodnotu $R_{21}=150\Omega$. Víceotáčkový trimr je volený z řady E3 na hodnotu $R_{23}=500\Omega$ a rezistor $R_{22}=680\Omega$.

Dosazením rezistorů do vzorce (28) se získá závislost, v níž velikost napětí $-U_{off}$ je dána pouze součtem napětí $U_{ob}+U_{ref}$.

$$-U_{off} = \frac{R_{24}}{R_{19}} U_{sz} + \frac{R_{24}}{R_{20}} U_{ref} \quad [V; \Omega, V] \quad (28)$$



Obr. 27: Schéma bloku E

Rezistor R_{25} a kondenzátor C_9 tvoří filtr typu dolní propust, který má nastavený dělicí kmitočet přibližně 10kHz. Rezistor R_{25} se vypočte se podle vzorce (29) z literatury [13].

Operační zesilovače $OZ6A$ a $OZ6B$ představují proudový zdroj s uzemněnou zátěží. Zapojení a vzorec (30) vychází z literatury [13].

$$R_{25} = \frac{1}{2\pi C_9 f_{zlom}} \quad [\Omega; F, Hz] \quad (29)$$

$$I_0 = U_v \frac{R_{29}}{(R_{27} + R_{28})R_{30}} \quad (30)$$

Rezistory R_{29} a R_{30} mají pro snadnější výpočet stejnou hodnotu $10k\Omega$. Napětí $U_v=10V$ a proud $I_0=20mA$. Víceotáčkovým trimrem R_{28} je možné upravit výstupní proud I_0 .

5 Závěr

Bakalářská práce se zabývá indukčnostními senzory polohy a jejich vyhodnocovacími obvody.

V úvodní kapitole jsem se snažil sjednotit různá názvosloví, která se dnes používají k označení senzorů. Nejvíce rozdílů jsem zaznamenal ve starší literatuře, s různorodou terminologií se ale můžeme setkat i v některých nových publikacích.

Senzory se stále vyvíjí a modernizují podle potřeb zákazníků; není tedy možné provést kompletní analýzu všech typů. Nepřeberné množství senzorů je v jednotlivých podkapitolách omezeno jen na základní rozdělení a principy indukčnostních senzorů polohy. Tyto senzory se vyznačují dobrými vlastnostmi, které je předurčují k použití v automatizační technice. Může to být vysoká přesnost a stabilita parametrů, odolnost proti prachu a vibracím, vysoká spolehlivost v náročných provozních podmínkách, atd. U typů senzorů s bezdotykovým snímáním nenastává téměř žádné opotřebení, což je dáno jejich konstrukcí. Obrovskou výhodou těchto senzorů je jejich použití v aplikacích s působením nepříznivých vlivů, jako je např. výbušné prostředí.

Hlavním cílem bakalářské práce je navrhnout vyhodnocovací obvod pro diferenciální indukčnostní snímač posunutí. Návrh vyhodnocovacího obvodu je koncipován rozkreslením do menších bloků a následným určením všech součástek v obvodu. Proudový výstup 0 až 20mA je určen pro připojení k proudové měřicí smyčce.

Současným trendem výrobců měřicí a regulační techniky je snaha nahrazovat obvodová řešení z diskrétních součástek monolitickými integrovanými obvody. Senzory a vyhodnocovací obvody jsou umístěny v jednom pouzdře a rozměry měřicích prvků se minimalizují.

Navržený vyhodnocovací obvod je jedním z možných konstrukčních řešení pro vyhodnocování signálů z indukčnostních senzorů polohy. Může sloužit jako námět pro konstruktéry, zabývající se touto oblastí měřicí techniky.

Literatura

- [1] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha : ČVUT, 1996. 315 s.
- [2] VEDRAL, J., FISCHER, J. *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. Praha : ČVUT, 1999. 339 s.
- [3] ZEHNULA, K. *Snímače neelektrických veličin*. Praha : SNTL, 1977. 400 s. ISBN 04-538-77
- [4] MARTINEK, R. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha : BEN, 2008. 200 s. ISBN 80-7300-114-4
- [5] ŠULA, O. *Snímače a převodníky měřících a regulačních přístrojů*. Praha : SNTL, 1968. 184 s. ISBN 04-506-68
- [6] RIPKA, P., ĎAĎO, S., KREIDL, M., NOVÁK, J. *Senzory a převodníky*. Praha : ČVUT, 2005. 135 s.
- [7] STANIA, L. *Systém pro měření a výpočet ztrátového součinitele ventilu*. Ostrava : VŠB-TUO, FEI, katedra 454, 2001. 49 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Tesař.
- [8] *Katalogový list k obvodu XR-2206*. Exar, 2008
URL:<http://www.exar.com/Files/Documents/XR2206_104_020808.pdf>
- [9] *Katalogový list k obvodu NE5532*. Texas Instruments, 2009
URL:<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf>>
- [10] *Katalogový list k obvodu AD598*. Analog Devices, 1989
URL:<http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD598.pdf>
- [11] *Katalogový list k obvodu AD698*. Analog Devices, 1995
URL:<http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD698.pdf>
- [12] *Katalogový list k obvodu AD2S90*. Analog Devices, 1999
URL:<http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD2S90.pdf>
- [13] *Amatérské rádio: řada B – pro konstruktéry*. Č. 4. Praha: MAGNET-PRESS, 1993
- [14] *Katalogový list k obvodu OPA132*. Burr-Brown, 2004
URL:<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa132.pdf>>
- [15] *Katalog: indukční snímače - principy*. Balluff, 2007
URL:<http://balluff.cz/Download/katalogy/haupt/S10_0703_cz.pdf>
- [16] *Katalogový list k diodě BY296*. Diotec Semiconductor, 2006.
URL:<<http://www.diotec.com/pdf/by296.pdf>>

- [17] *Katalogový list k obvodu 4053*. UNISONIC TECHNOLOGIES CO., LTD, 2009
URL:<<http://www.unisonic.com.tw/datasheet/4053.pdf>>

Seznam příloh

- I. Schéma zapojení vyhodnocovacího obvodu
- II. Průběhy napětí